

ПИРИГ ЯРОСЛАВ

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0009-0001-2104-8439>
e-mail: yaroslavpyrih@gmail.com

ПИРИГ ЮЛІЯ

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0000-0002-8973-4005>
e-mail: yuliia.v.klymash@lpnu.ua

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ СЕНСОРНИХ ВУЗЛІВ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ

Робота присвячена розв'язанню задачі оптимального розміщення вузлів у безпроводній сенсорній мережі. Описано причини додавання нових вузлів до існуючої мережі. Вибрано mesh топологію як одну із популярних і ефективних топологій для БСМ. Розроблено метод оптимального розміщення вузлів з урахуванням особливостей mesh топології на основі застосування генетичної еволюції. Представлено блок-схему роботи генетичного алгоритму, основними етапами якого є відбір, мутація та схрещування. Для перевірки працездатності запропонованого рішення щодо визначення оптимального розміщення вузлів у mesh топології створено програмний продукт на мові програмування Python. На основі результатів імітаційного моделювання показано, що застосування генетичної еволюції приводить до стабілізації розміщення вузлів, при цьому збільшення кількості поколінь наближає алгоритм до глобального оптимуму. Найкращий результат розміщення 75 нових вузлів при наявності 25 існуючих отримано при розмірі популяції – 1000, кількості поколінь – 260. Отримані результати продемонстрували швидку конвергенцію на ранніх стадіях, що демонструє здатність алгоритму швидко знаходити якісні рішення.

Ключові слова: генетична еволюція, сенсорний вузол, топологія мережі, фітнес функція, кількість поколінь.

PYRIH YAROSLAV, PYRIH YULIYA
Lviv Polytechnic National University

AN OPTIMAL SENSOR NODE PLACEMENT METHOD BASED ON GENETIC EVOLUTION

The paper is devoted to solving the problem of optimal placement of nodes in a wireless sensor network. The reasons for adding new nodes to an existing network are described. The mesh topology is chosen as one of the most popular and effective topologies for WSNs due to its flexibility, reliability, and ability to provide a high degree of network connectivity. A method for optimal node placement, taking into account the features of the mesh topology, has been developed based on the use of genetic evolution. A block diagram of the genetic algorithm is presented, the main stages of which are selection, mutation and crossing. To determine the suitability of each individual, a fitness function is calculated, which evaluates the 'overflow' of squares on the considered plane. Accordingly, the number of nodes in each square is determined by adding the matrices for new and existing nodes. The fit-non function is formed, which is advisable to use for the problem of distributing objects where it is necessary to avoid their accumulation in one place, i.e. to maximise the uniformity of distribution. To test the performance of the proposed solution for determining the optimal placement of nodes in a mesh topology, a software product in the Python programming language was created. Based on the results of simulation modelling, the intermediate results of the developed algorithm, the best solution obtained, characterised by uniform placement of nodes, and the dependence of the fitness function value on the number of generations are presented. It is shown that the use of genetic evolution leads to stabilisation of the node placement, while an increase in the number of generations brings the algorithm closer to the global optimum. The best result of placing 75 new nodes in the presence of 25 existing ones was obtained when the population size was 1000 and the number of generations was 260. The obtained results demonstrate rapid convergence in the early stages, which demonstrates the ability of the algorithm to quickly find high-quality solutions. The stabilisation of the fitness function indicates the achievement of a certain level of optimality. This can be used to set a criterion for stopping the algorithm, which will reduce computational costs by stopping the evolution after reaching a stable state.

Keywords: genetic evolution, sensor node, network topology, fitness function, number of generations.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) є складними системами, які складаються з сенсорних вузлів, що взаємодіють між собою для збору, обробки та передачі даних. Раціональне розміщення сенсорних вузлів у є фундаментальним кроком для забезпечення ефективної роботи мережі. Врахування покриття мережі, енергоспоживання, зв'язності, затримки передачі даних та інтерференції дозволяє створити надійну та енергоефективну систему. Це забезпечує стабільну роботу мережі та підвищує її ефективність для різних областей застосувань.

У сучасних умовах часто виникає потреба в додаванні нових вузлів, що може бути викликано такими причинами [1]:

– збільшення площі покриття мережі, внаслідок чого забезпечується більш детальний і точний збір даних з нових ділянок, що сприяє покращенню якості моніторингу.

– підвищення щільності вузлів, що дозволяє покращити точність і надійність зібраних даних. Це особливо доцільно для середовищ, які характеризуються високою ймовірністю перешкод і втрат даних.

– заміна несправних вузлів або вузлів із застарілими функціональними можливостями, що є необхідною для підтримки роботи мережі із наданням відповідних послуг.

– підвищення продуктивності мережі з точки зору маршрутизації даних. Проміжні вузли, встановлені між існуючими, можуть зменшити кількість переходів між вузлами, що сприяє зниженню затримки передачі

даних.

Розміщення нових вузлів у місцях, де існують прогалини в покритті – так звані «мертві зони», дозволяє забезпечити безперервну передачу даних по всій мережі. Це знижує ризик втрати даних та покращує якість зв'язку, що є критичним для додатків, де необхідна висока надійність і точність, таких як моніторинг здоров'я, військові операції тощо.

Таким чином, задача оптимального розміщення вузлів у БСМ є актуальною.

Аналіз досліджень та публікацій

Наукова спільнота приділяє увагу задачі оптимального розміщення вузлів, що підтверджується рядом публікацій, зокрема [2–5].

Робота [2] присвячена багатокритеріальній задачі розгортання та призначення потужностей вузлів у БСМ шляхом використання еволюційного алгоритму. Пропоноване рішення використовує специфічні для кожної задачі генетичні оператори, евристики локального пошуку та нову схему кодування. Для оцінки ефективності розробленого алгоритму MOEA/D здійснено його порівняння із алгоритмом MOGA. На основі результатів імітаційного моделювання показано перевагу MOEA/D з точки зору якості рішень та швидкості збіжності.

Автори [3] розглянули керування топологією з урахуванням енергії для БСМ шляхом використання алгоритмів. Запропонований алгоритм ToCMA досліджує простір рішень за допомогою комбінації операторів генетичного алгоритму та техніки локального пошуку. Для імітаційного моделювання для кожного покоління розглядалось 30 хромосом, для відбору використовувався турнірний оператор із розміром турніру 16, одноточковий оператор схрещування. Здійснено порівняння ефективності роботи алгоритмів MST і ToCMA для мереж різної щільності, на основі чого показано ефективність розробленого рішення.

У [4] представлено енергоефективний алгоритм покриття в БСМ, який здійснює моніторинг зони та передачу результатів, використовуючи мінімальну кількість вузлів. Його робота базується на навчанні з підкріпленням для алгоритму Неша, який забезпечує мінімальний час збіжності. Пропоноване рішення допомагає підтримувати бажаний рівень покриття і зв'язку, що забезпечується активними сенсорними вузлами із різними радіусами дії в кожному раунді планування. Результати імітаційного моделювання із використанням OMNeT і Python продемонстрували ефективність використання розробленого алгоритму по критерію середньої кількості активних сенсорних вузлів, кількості зон покриття, рівня покриття та енергоспоживання.

Робота [5] демонструє два авторські алгоритми розміщення проміжних вузлів, які забезпечують k-зв'язність сенсорних вузлів. Перший алгоритм базується на генетичному алгоритмі (розмір популяції – 60, рулетковий оператор відбору, одноточковий оператор схрещування), другий – на основі жадібного підходу. Використовуючи середовище Matlab, здійснено імітаційне моделювання для мереж із розмірами полів 100×100 і 300×300 м. На основі отриманих результатів показано, що підхід на основі ГА потребує меншої кількості проміжних вузлів для забезпечення k-зв'язності, ніж жадібний.

На основі аналізу розглянутих робіт, варто відзначити ефективність використання еволюційних алгоритмів.

Отже, враховуючи зростаючі вимоги до якості обслуговування, розширення сфер застосування та інновації у технологіях, задача оптимального розміщення вузлів у БСМ потребує подальших досліджень.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розроблення методу оптимального розміщення сенсорних вузлів на основі генетичної еволюції.

Виклад основного матеріалу

Генетичний алгоритм (ГА), як метод глобальної оптимізації, дозволяє знайти оптимальні місця для розміщення вузлів з урахуванням топології всієї мережі. Це забезпечує мінімальне порушення існуючої структури mesh і зменшує негативний вплив на її регулярність.

Таким чином, використання ГА для розміщення вузлів у mesh топології дозволяє усунути недоліки, пов'язані зі зміною топології або додаванням нових вузлів. Він забезпечує оптимальну інтеграцію нових елементів у мережу завдяки можливостям адаптації до динамічних змін [6], мінімізуючи порушення її регулярності та підвищуючи загальну ефективність роботи мережі.

ГА досліджує простір рішень шляхом створення нових особин (можливих рішень) у популяції, кожна з яких представляє певне рішення. Спочатку популяція може містити різноманітні і, можливо, неефективні рішення. Протягом декількох поколінь, через відбір, схрещування та мутації, алгоритм генерує нові особини, що мають потенційно кращі характеристики [7].

Варто зауважити, що для задачі оптимального розміщення сенсорних вузлів простір рішень складається з усіх можливих конфігурацій розміщення таких вузлів на досліджуваній площині.

На рис. 1 представлено узагальнену блок-схему пропонуваного ГА розміщення мережевих вузлів для mesh топології.

Розглянемо етап вхідних даних для роботи наведеного алгоритму. Розмір досліджуваного поля задається у кількості квадратів – 10×10 . Розмір популяції – 1000, кількість поколінь – 400, для динамічного корегування вибрано такі діапазони імовірності схрещування та мутації як [0.5; 0.8] та [0.05; 0.2] відповідно. На наступному етапі рандомно здійснюється присвоєння координат (x, y) вузлам мережі. Після чого

відбувається формування особин, що являє сукупність координат вузлів.

Для визначення придатності кожної особини здійснюється обчислення фітнес функції, яка оцінює «переповнення» квадратів на розглянутій площині. Відповідно визначається кількість вузлів у кожному квадраті шляхом додавання матриць для нових і існуючих вузлів.

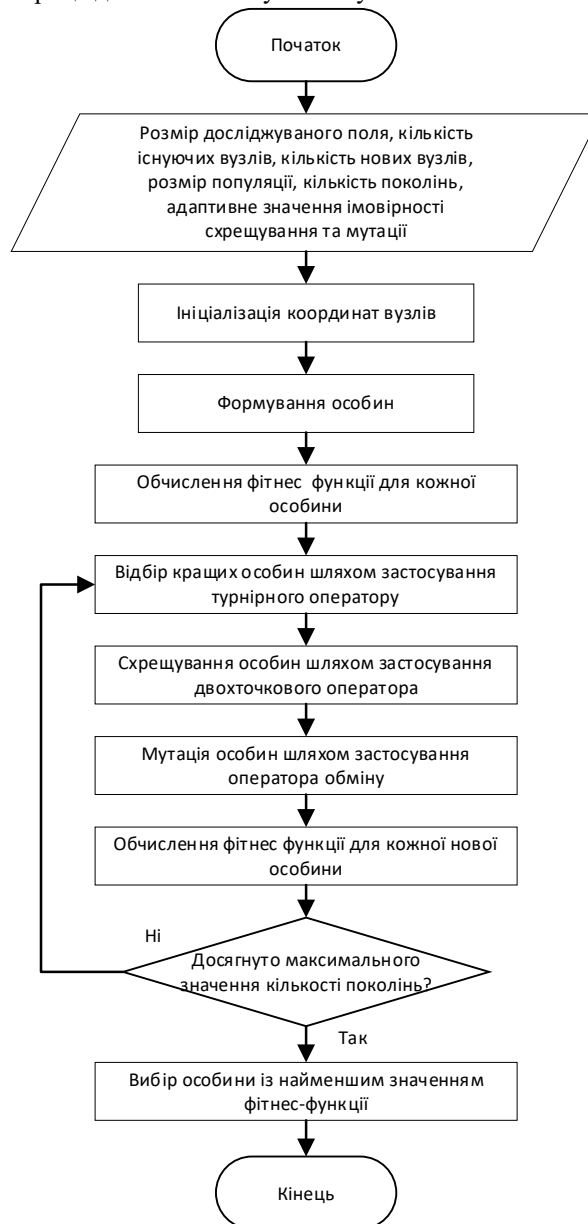


Рис. 1. Узагальнена блок-схема пропонованого ГА

Для існуючих вузлів матриця складається із 0 та 1: 1 – якщо вузол є, 0 – якщо вузла немає у розглянутому квадраті; для нових вузлів – від 0 до k , де k – кількість вузлів, які одночасно знаходяться у одному квадраті.

Якщо є більше одного вузла в одному квадраті, то відбувається віднімання 1. Внаслідок цього ГА шукає рішення, що мінімізують кількість перевантажених квадратів, тобто зменшують кількість вузлів, розміщених у межах одного квадрату. Це забезпечує більш рівномірний розподіл вузлів по всьому полю, що важливо для оптимальної роботи мережі.

Фітнес функцію $f(t_{net})$ можна представити як:

$$f(t_{net}) = \sum_{i=1}^N \max(0, val_{matr}(i) - 1), \quad (1)$$




де $val_{matr}(i)$ – значення у матриці для кожного квадрату i ; N – загальна кількість квадратів на досліджуваному полі.

Функція (1) мінімізує кількість зайвих об'єктів у кожній клітинці. Чим менше значення $f(t_{net})$ тим краще, оскільки це означає, що розподіл об'єктів по квадратах є більш рівномірним. Отже, у контексті оптимізації фітнес функцію (1) доцільно використовувати для задачі розподілу об'єктів, де потрібно уникати їх скупчення в одному місці, тобто максимізувати рівномірність розподілу.

Після визначення значення фітнес функції для кожної особини із початкової популяції здійснюється їх зміна шляхом використання наступних генетичних операторів: для етапу відбору – турнірного, для етапу

схрещування – двоточкового, для етапу мутації – обміну. Далі новоутворені особини оцінюються з точки зору придатності для вирішення поставленої задачі шляхом використання (1). Критерієм зупинки роботи алгоритму є досягнення заданої кількості поколінь, після чого вибирається особина із найменшим значенням розглянутої фітнес функції.

Для перевірки працездатності запропонованого ГА для визначення оптимального розміщення вузлів у mesh топології створено програмний продукт на мові програмування Python.

Здійснено дослідження щодо оптимального розміщення 75 нових вузлів при наявності 25 існуючих. На рис. 2 представлено проміжні результати процесу формування оптимального розміщення вузлів мережі на досліджуваній площині для кількості поколінь 25 – 100 із кроком 25.  позначає новий мережевий вузол, який розміщується один у певному квадраті площини,  – два і більше вузлів, які одночасно розміщуються у квадраті,  – існуючий мережевий вузол.

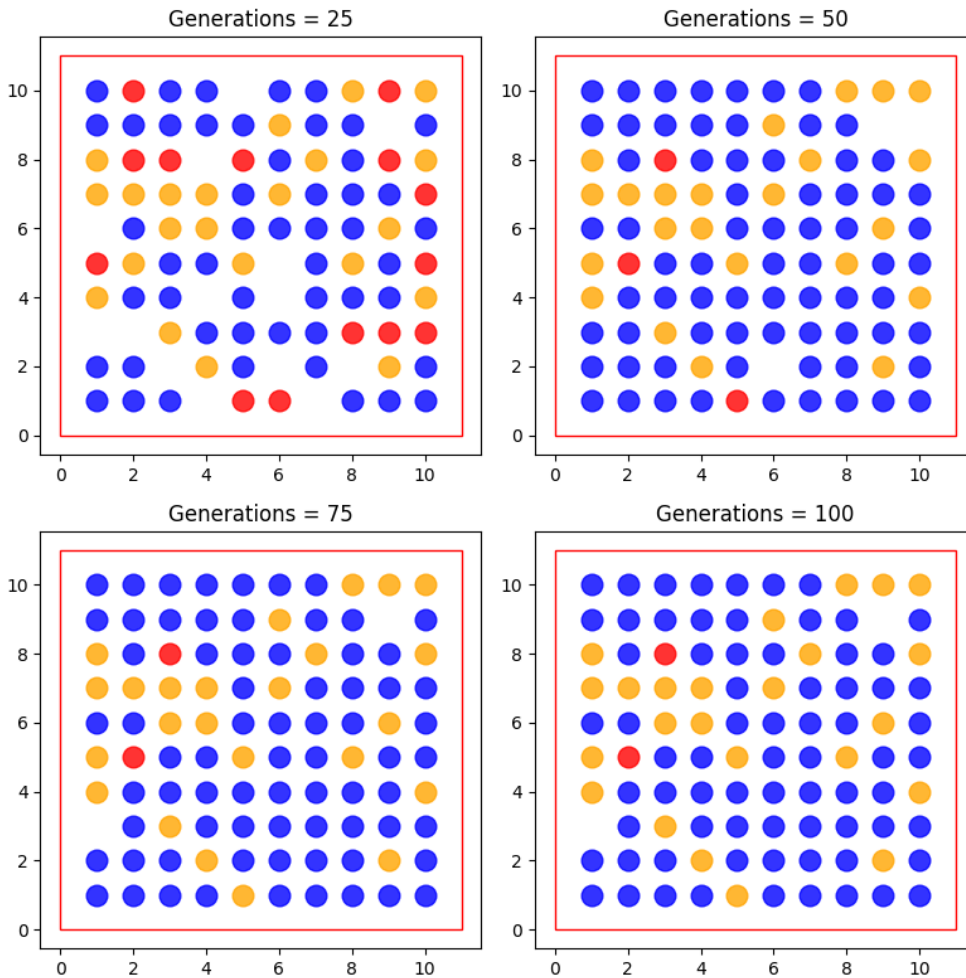


Рис. 2. Проміжні результати роботи розробленого алгоритму

Як бачимо з рис. 2, при $G = 25$ спостерігається найбільша кількість «переповнених» квадратів, при подальшому збільшенні значення G вузли більш рівномірно розміщуються по представленій площині.

Відповідно процес генетичної еволюції приводить до стабілізації розміщення вузлів, при цьому збільшення кількості поколінь наближає алгоритм до глобального оптимуму.

Найкращий результат розміщення 75 нових вузлів при наявності 25 існуючих отримано при $G = 260$, що продемонстровано на рис. 3. На рис. 4 представлено залежність значення фітнес функції $f(t_{net})$ від кількості поколінь G .

Відповідно до рис. 4., зі збільшенням кількості поколінь ГА знаходить усе більш оптимальні рішення для розміщення вузлів, наближаючи систему до глобального оптимуму, який спостерігається при $G = 260$.

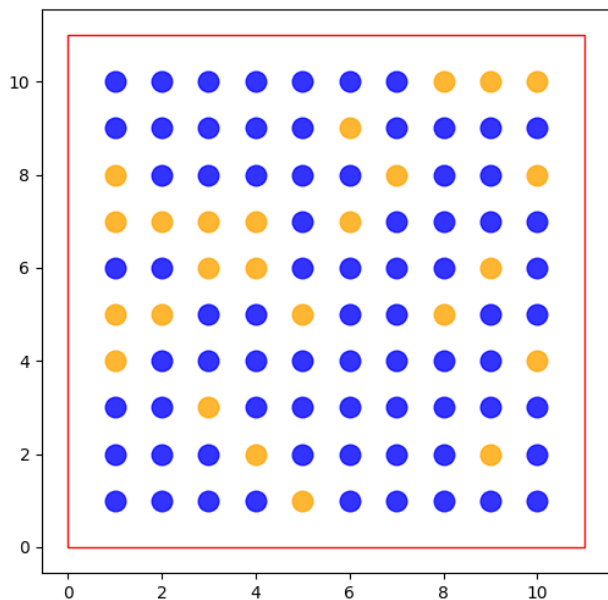


Рис. 3. Розміщення 75 нових вузлів при 25 існуючих

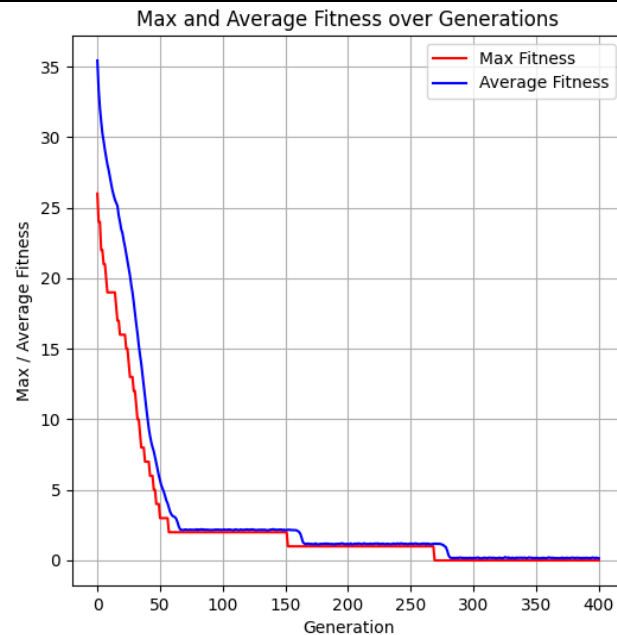


Рис. 4. Залежність значення фітнес функції від кількості поколінь

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі представлено метод оптимального розміщення сенсорних вузлів на основі застосування сукупності генетичних операторів: для етапу відбору – турнірного, для етапу схрещування – двоточкового, для етапу мутації – обміну. Сформовано фітнес функцію, яку доцільно використовувати для задачі розподілу об'єктів, де потрібно уникати їх скупчення в одному місці, тобто максимізувати рівномірність розподілу. Для перевірки працездатності розробленого рішення для визначення оптимального розміщення вузлів у mesh топології створено програмний продукт на мові програмування Python.

На основі результатів імітаційного моделювання показано швидку конвергенцію на ранніх стадіях, що демонструє здатність алгоритму швидко знаходити якісні рішення. Стабілізація фітнес-функції свідчить про досягнення певного рівня оптимальності. Це може бути використано в подальшому для встановлення критерію зупинки алгоритму, що дозволить зменшити обчислювальні витрати, припиняючи еволюцію після досягнення стабільного стану.

References

1. Meguerdichian S., Koushanfar F., Potkonjak M., Srivastava M. B. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. Conference on Computer Communications, Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society, Anchorage, AK, USA. 2001. p. 1380-1387.
2. Konstantinidis A., Yang K., Zhang Q. An Evolutionary Algorithm to a Multi-Objective Deployment and Power Assignment Problem in Wireless Sensor Networks. IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, LA, USA. 2008. p. 1-6.
3. Konstantinidis A., Yang K., Chen H.-H., Zhang Q. Energy-aware topology control for wireless sensor networks using memetic algorithms. Computer Communications. 2007. p. 2753-2764.
4. Sharma A., Chauhan S. A distributed reinforcement learning based sensor node scheduling algorithm for coverage and connectivity maintenance in wireless sensor network. Wireless Netw. 2020. p. 4411-4429.
5. Gupta S.K., Kuila P., Jana P.K. Genetic Algorithm for k-Connected Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks. Proceedings of the Second International Conference on Computer and Communication Technologies. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016.
6. Zhuang Z., Weng Y., Min Xie Y., Wang C., Zhang X., Zhou S. A node moving-based structural topology optimization method in the body-fitted mesh. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2024.
7. Pyrih Ya., Klymash M., Pyrih Yu., Lavriv O. GENETIC ALGORITHM AS A TOOL FOR SOLVING OPTIMISATION PROBLEMS. Information and communication technologies, electronic engineering, № 3 (2). 2023. 95-107.